

# **SECADO DE MAÍZ CON AIRE NATURAL EN LECHO FIJO: COMPARACIÓN DE SIMULACIONES COMPUTACIONALES REALIZADAS CON MODELOS MATEMÁTICOS DE NO- EQUILIBRIO**

M. A. Martinello<sup>(1)</sup>, D. J. Muñoz<sup>(1)</sup>, S. A. Giner<sup>(2)</sup>

(1) Departamento de Tecnología Química-Facultad de Ingeniería

(Universidad Nacional de Río Cuarto)

Ruta 8 km. 601 – 5800 Río Cuarto – Argentina

(2) CIDCA-Universidad Nacional de La Plata

Área Departamental Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería,

(Universidad Nacional de La Plata)

Calle 47 y 116. (1900) La Plata.

E-mail: [mmartinello@ing.unrc.edu.ar](mailto:mmartinello@ing.unrc.edu.ar)

**Resumen.** En este trabajo se comparan dos modelos de no equilibrio para representar el proceso de secado natural de maíz en lecho fijo. Los dos modelos propuestos, que difieren básicamente en las ecuaciones de balance de materia y de energía para el aire, son (a) modelo pseudoestacionario (PsEst) en el que se desprecian los términos de acumulación y (b) modelo no estacionario (NEst), en el que se consideran los términos de acumulación. Ambos modelos se resuelven en forma numérica por el método de las líneas, usando los algoritmos más apropiados para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDOs) que resulta de la discretización de las derivadas espaciales por diferencias finitas. Se analizaron, tanto en condiciones del aire constante como bajo condiciones realistas usando datos meteorológicos, los resultados predichos tales como tiempo de secado, humedad final, perfiles de humedad y temperatura y consumo específico de energía, así como también parámetros representativos del “costo computacional relativo”, a través del tiempo de cálculo. Los resultados predichos por los dos modelos son muy similares y

seleccionando el algoritmo de resolución de las EDOS más apropiado para cada caso, los tiempos de cálculo son aceptables para ambos modelos. Aunque el paso de tiempos resulta mayor para el modelo NEst, lo que implica un mayor error de truncación local. Se concluye que el modelo simplificado (PsEst) es adecuado para modelar el secado de maíz en lecho fijo en las condiciones operativas típicas del secado natural.

**Palabras clave:** SECADO NATURAL, MODELOS DE NO EQUILIBRIO, MAIZ.

## **1. Introducción**

En el secado con aire natural o de baja temperatura, se utiliza aire en condiciones ambientales, por lo cual el gasto de energía corresponde solamente al requerido para el funcionamiento del ventilador. Es muy común que se lleve a cabo en lechos fijos profundos. El proceso tiene el objetivo de conducir a un producto de mayor calidad que el obtenible a través del secado convencional con aire caliente. El comportamiento del secador con aire natural depende fuertemente de las condiciones meteorológicas y al tratarse de un proceso lento, las determinaciones experimentales son difíciles y costosas, por ello es de fundamental importancia disponer de un modelo matemático adecuado para la simulación computacional del proceso.

En el secado con aire de baja temperatura, resulta fundamental la predicción de las curvas de secado e historias térmicas del producto en distintas condiciones operativas, a efectos de conocer en detalle el desarrollo del proceso para evitar la permanencia de zonas de alta temperatura y alta humedad que puedan promover el desarrollo microbiano antes de terminar el secado, o bien que produzcan una alta tasa respiratoria (Sauer, 1992). Es importante entonces contar con un modelo matemático de secado en lecho fijo, que sea capaz de predecir la transferencia de calor y materia aire-grano a distintos flujos de aire. La disponibilidad de un modelo adecuado para el secadero es fundamental tanto para el diseño como para la optimización de su operación (Sun et al., 1995).

El modelo debe ser flexible, robusto y capaz de tener en cuenta un amplio rango de condiciones del aire y del grano (Sharp, 1982).

La mayor ventaja de los modelos validados para simulación es su habilidad para responder preguntas del tipo, ¿Que pasa si? , y permiten obtener resultados para distintos lugares, usando los datos meteorológicos locales (Jayas y White, 2003).

Básicamente los modelos de secado de granos, tanto de alta como de baja temperatura, pueden clasificarse como modelos de parámetros concentrados (simples y con parámetros a determinar experimentalmente) y modelos de parámetros distribuidos (más complejos y que proveen información detallada del proceso). Los modelos de parámetros distribuidos son superiores como modelos de proceso y, si bien requieren mayor tiempo de cómputo, teniendo en cuenta que actualmente los costos computacionales se han reducido considerablemente, esto ya no constituye una desventaja importante desde el punto de vista de la simulación (Lufty et al., 2008).

Uno de los modelos de parámetros distribuidos mas comúnmente empleado es el modelo de ecuaciones diferenciales que se basa en las ecuaciones de conservación de masa y energía, para el grano y para el aire que conduce a un sistema de cuatro ecuaciones diferenciales parciales no lineales (modelo EDP). Otra clasificación distingue a los modelos de equilibrio (EQ) de los de no equilibrio (NEQ). En el primer caso se considera que la humedad del sólido alcanza el valor de equilibrio con el aire con el que está en contacto en cada capa, con lo cual sólo es necesario disponer de la ecuación de equilibrio para el grano, mientras que en el segundo caso no se asume que se llega al equilibrio y por lo tanto se requiere una ecuación cinética que represente la velocidad de secado (Brooker et al., 1992).

Hay distintas versiones de los modelos EDP: modelos complejos que tienen en cuenta diversos factores y modelos más simples que surgen de la consideración de hipótesis simplificadoras. Así, pueden encontrarse casos en los que se desprecian los términos de acumulación del vapor o la energía en aire, obteniéndose lo que se suelen denominar como modelos pseudo estacionarios, en este trabajo se lo denominará PsEst, para distinguir del modelo completo ó totalmente no estacionario (NEst) (Brooker et al., 1992). Hay evidencias en trabajos publicados acerca de la inexactitud de los resultados predichos por modelos que desprecian los términos de acumulación en el aire en ciertas condiciones (relación altura lecho/velocidad del aire  $< 0,2$  s;  $T_a \leq 30^{\circ}\text{C}$  y  $h_{ra} \geq 0,50$ ) (Wang, 1993; Aregba y Nadeu, 2007).

Hay varios trabajos publicados sobre el modelado de secado natural de granos basado en las ecuaciones diferenciales de balance de masa y energía, para distintos

granos y con distintas hipótesis simplificadoras aplicados en distintos lugares, tales como los presentados por Sun et al. (1995), Bowden et al. (1983) y Hossain et al. (2003).

Se requiere estudiar el caso específico de secado de maíz en Argentina, a efectos de determinar el modelo que represente adecuadamente el comportamiento del secado natural de maíz en las condiciones meteorológicas de las zonas maiceras del país. El objetivo de este trabajo es comparar dos modelos de no equilibrio, PsEst y NEst, para el proceso de secado natural de maíz en lecho fijo.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Formulación Numérica del Modelo PsEst-NEQ

El modelo pseudoestacionario de equilibrio térmico y no equilibrio másico (PsEst-NEQ), está conformado por las ecuaciones de balance de masa para el agua en el sólido (Ec. 1), balance de masa para el agua en el aire (Ec. 2) y el balance de energía en el lecho (Ec. 3):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{n_w a}{\rho_L} \quad (1)$$

$$0 = -G_a \frac{\partial Y}{\partial z} + n_w a \quad (2)$$

$$(\rho_L C_{ps}) \frac{\partial T_s}{\partial t} = -G_a \left( \frac{\partial Y}{\partial z} \right) L_g - G_a \left( C_{pah} \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Además de la ecuación constitutiva para la cinética de secado dada por la Ec. 4 (Misra y Brooker, 1980) y la condición de equilibrio térmico (igualdad de temperaturas del sólido y del aire).

$$n_w a = \rho_s (X - X_e) (K) \left( \frac{t}{3600} \right)^N \frac{N}{t/3600} \quad (4)$$

Las condiciones iniciales y de borde, son las dadas por la Ec. 5:

$$\begin{aligned}
t = 0 \quad X = X_0 \quad T_s = T_{s0} \quad 0 \leq z \leq Z_{\max} \\
z = 0 \quad Y = Y_{\text{en}} \quad T_a = T_{a\text{en}} \quad t > 0
\end{aligned} \tag{5}$$

La resolución numérica se realizó por el método de las líneas, usando diferencias finitas hacia atrás para reemplazar las derivadas espaciales. Se obtuvo así un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDOs) cuyo tamaño depende del valor de tamaño de paso espacial,  $N_z$  (Ecs. 6 a 9). Este sistema se resolvió con el algoritmo ode 113 de Matlab, el cual aplica el método de orden variable de Adams-Bashforth-Moulton PECE (predictor evaluador corrector evaluador) de orden variable., con paso de tiempo variable. Es una rutina multipaso generalmente más eficiente que la estándar ode 45 (fórmula explícita Runge Kutta (4,5) par Dormand-Prince, de un paso, que suele aplicarse como primera opción y tiene un orden de exactitud medio). El orden de exactitud de la ode 113 es de bajo a alto. Se aplica cuando se requiere una tolerancia de error rigurosa o para resolver un sistema EDO computacionalmente intensivo.

$$\rho_L \frac{dX_i}{dt} = -n_{wi}a \tag{6}$$

$$0 = -G_a \left( \frac{Y_{i+1} - Y_i}{\Delta z} \right) + n_{wi}a \tag{7}$$

$$\rho_L C_{ps} \frac{dT_{si}}{dt} = -G_a \left( C_{pa} \left( \frac{T_{a\ i+1} - T_{a\ i}}{\Delta z} \right) + L_g \left( \frac{Y_{i+1} - Y_i}{\Delta z} \right) \right) \tag{8}$$

$$T_{a\ i+1} = T_{s\ i} \tag{9}$$

Debe formarse una única matriz con las variables dependientes ( $X$  y  $T_s$ ) para todos los puntos de la grilla. Luego, la matriz resultante se divide para obtener los vectores correspondientes a los valores de  $X$  y  $T_s$ , para todos los puntos de la grilla y todos los tiempos (Lee et al., 2004).

## 2.1. Formulación Numérica del Modelo NEst-NEQ

El modelo no estacionario de no equilibrio másico ni térmico (NEst-NEQ), está conformado por las ecuaciones de balance de masa para el agua en el sólido (Ec. 10),

balance de masa para el agua en el aire (Ec. 11), balance de energía para el sólido (Ec. 12) y el balance de energía para el aire (Ec. 13).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{n_w a}{\rho_L} \quad (10)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{G_a}{\epsilon_0 \rho_a} \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{n_w a}{\epsilon_0 \rho_a} \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{a}{\rho_L C_{ps}} \left( h_v (T_a - T_s) - n_w L_g \right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_a}{\partial t} = & -\frac{h_v a}{\rho_a \epsilon_0 C_{pa}} (T_a - T_s) - \frac{G_a}{\rho_a \epsilon_0} \left( \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_a \epsilon_0 C_{pa}} [n_w a (H_v - H_{va})] \end{aligned} \quad (13)$$

Además de las ecuaciones constitutivas para la cinética de secado,  $n_w$  (Ec. 4) y el coeficiente de intercambio de calor dada por la Ec. 14 (Brooker et al., 1992).

$$h_v = 0,2755 C_{pa} G_a \left( \frac{(0.06175 + 0.000165 T_a)}{2 R_g G_a a 3600} \right)^{0.34} \quad (14)$$

La principal diferencia con el modelo PsEst se aprecia en las ecuaciones 11 y 13, en las que no se han eliminado los términos de acumulacion y no se considera equilibrio termico para el modelo NEst.

Las condiciones iniciales y de borde, son las dadas por la Ec. 15:

$$\begin{aligned} t = 0 \quad & X = X_0 \quad & T_s = T_{s0} \quad & 0 \leq z \leq Z_{\max} \\ t = 0 \quad & Y = Y_0 \quad & T_a = T_{a0} \quad & 0 \leq z \leq Z_{\max} \\ z = 0 \quad & Y = Y_{en} \quad & T_a = T_{aen} \quad & t > 0 \end{aligned} \quad (15)$$

La resolución numérica de este modelo se realizó de la misma manera que con el modelo PsEst, aplicando el método de las líneas y usando diferencias finitas hacia atrás para reemplazar las derivadas espaciales. En este caso queda un sistema de cuatro

ODEs, mientras que para el modelo PsEst se obtuvo un sistema de dos ODEs (Ec. 16 a 19).

Se procede de la misma forma que el caso anterior, formando una única matriz con las variables dependientes ( $X$ ,  $Y$ ,  $T_a$  y  $T_s$ ) y luego la matriz resultante se divide para obtener los vectores correspondientes a sus valores para todos los puntos de la grilla y todos los tiempos.

$$\rho_L \frac{dX_i}{dt} = -n_{wi} a \quad (16)$$

$$\frac{dY_i}{dt} = -\frac{G_a}{\varepsilon \rho_a} \left( \frac{Y_i - Y_{i-1}}{\Delta z} \right) + \frac{n_{wi} a}{\varepsilon \rho_a} \quad (17)$$

$$\frac{dT_{si}}{dt} = \frac{a}{\rho_L C_{ps}} \left( h_{vi} (T_{ai} - T_{si}) - n_{wi} L_{gi} \right) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{ai}}{dt} = & -\frac{h_{vi} a}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} (T_{ai} - T_{si}) - \frac{G_a}{\rho_a \varepsilon_0} \left( \left( \frac{T_{ai} - T_{ai-1}}{\Delta z} \right) \right) \\ & + \frac{1}{\rho_a \varepsilon_0 C_{pa}} [n_{wi} a (H_{vi} - H_{vai})] \end{aligned} \quad (19)$$

En lo que respecta a la rutina de cálculo para resolver el sistema de ODEs del modelo NEst, se tuvieron que considerar otras opciones, en particular relacionadas con problemas stiff, tales como la ode 15s, ode 23s, ode23t y ode 23tb, ya que las usada para el modelo PsEst, no resulta adecuada por ser muy elevado el tiempo de cálculo. Se encontró que, teniendo en cuenta el compromiso entre exactitud de los resultados y el tiempo de computo, para aire en condiciones constantes la más adecuada es la ode15s mientras que para aire en condiciones variables la ode 23tb.

#### Nomenclatura

**a:** área interfacial de las partículas (área de secado) por unidad de volumen de lecho, (1/m).

**C<sub>pa</sub>:** calor específico del aire, [energía aire húmedo /masa aire seco temp.], (J/kg as °C).

**C<sub>ps</sub>:** calor específico del sólido, [energía sol. húmedo/masa sólido seco temp.], (J/kg ss°C).

**G<sub>a</sub>:** caudal másico superficial del aire, (kg as/s m<sup>2</sup>).

**E<sub>esp</sub>:** energía específica consumida por el ventilador, (MJ/kg agua evaporada)

**h<sub>ra</sub>:** humedad relativa del aire, dec.

**$h_v$**  : coeficiente de transferencia de calor, [energía /área partículas tiempo °C], ( $J/s\ m^2\ ^\circ C$ )  
 **$H_v$**  : entalpía del vapor de agua a la temperatura del sólido (J/kg)  
 **$H_{va}$**  : entalpía del vapor de agua a la temperatura del aire (J/kg)  
**K**: parámetro ecuación cinética de secado  
 **$L_g$**  : calor de sorción del agua adsorbida en el grano, (J/kg).  
**N**: parámetro ecuación cinética de secado  
 **$n_w$** : velocidad de secado, [ masa de agua/área superficial partícula tiempo], ( $kg/m^2\ s$ ).  
 **$Q_{vv}$** : caudal volumétrico del aire por unidad de volumen de lecho, [volumen de aire/volumen de lecho tiempo], (1/s).  
 **$R_g$** : radio del grano, (m)  
**t**: tiempo, (s).  
 **$T_a$** : temperatura del aire, ( $^\circ C$ ).  
 **$T_s$** : temperatura del sólido, ( $^\circ C$ ).  
**X**: humedad del sólido, base seca, (b.s.).  
**Y**: humedad del aire b.s (kg agua/kg as)  
**z** : coordenada altura de lecho  
 **$Z_{max}$**  : altura total del lecho (m).  
 Letras griegas:  
 **$\rho_L$**  : densidad del lecho de sólidos seco, [masa sólido seco/volumen lecho], ( $kg\ ss /m^3$ ).  
 **$\rho_a$**  : densidad del aire seco, [masa aire seco/volumen aire], ( $kg\ a.s/m^3$ ).  
 **$\epsilon$** : porosidad del lecho, [volumen de huecos/volumen de lecho]  
*Subíndices:*  
 $_0$ : inicial  
 $_{en}$ : entrada  
 $_f$  : final  
 $_e$ : equilibrio  
 $_s$ : secado  
 $_{pr}$ : promedio  
 $_i$ : coordenada de espacio  
 $_j$ : coordenada de tiempo

Se fijó la humedad en la última capa de los granos igual al valor seguro para el almacenamiento de maíz: 14,5 b.h. (0,17 dec., b.s). Se consideró un caso base de estudio para la comparación, teniendo en cuenta los valores típicos para esta operación: altura del lecho: 3m, caudal de aire: 0,03 m<sup>3</sup>/s m<sup>3</sup>, humedad inicial de los granos: 0,20 dec., b.s. y temperatura inicial del sólido 20°C.



### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Comparación de Modelos PsEst-NEQ y NEst-NEQ. Condiciones del Aire Constantes.

Se consideraron dos temperaturas (10°C-20°C) y dos valores de humedad relativa (0,40-0,60), que combinados dan lugar a cuatro casos, con su correspondiente humedad de equilibrio del grano,  $X_e$ :

Caso 1:  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$  ( $X_e=0,1391$ )

Caso 2:  $T_a=10^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$  ( $X_e=0,1468$ )

Caso 3:  $T_a=10^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,40$  ( $X_e=0,1145$ )

Caso 4:  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,40$  ( $X_e=0,1068$ )

Para cada uno de estos casos se usaron tres valores de caudal de aire: 0,01, 0,02 y 0,03  $\text{m}^3/\text{s m}^3$ ).

Para el tamaño de paso se seleccionó el valor de  $\Delta z=0,015$ . Las condiciones iniciales del aire se consideraron iguales a las de entrada.

Los resultados predichos por los dos modelos se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Comparación de modelos de no equilibrio pseudoestacionarios (PsEst) y no estacionario (NEst). Condiciones del aire constantes. Caso base.  $\Delta z=0,015\text{m}$ .

##### (a) Caso 1

$Q_{vv}$	tiempo		$X_{prf}$		$t_s$		$E_{esp}$	
( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	cálculo		(dec. b.s.)		(h)		(MJ/ kg agua evaporada)	
s)	(s)							
	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest
0,01	101	393	0,1542	0,1540	698,57	734,49	0,229	0,309
0,02	106	384	0,1563	0,1570	377,99	384,67	0,837	0,866
0,03	107	394	0,1577	0,1590	263,33	266,91	1,601	1,673

##### (b) Caso 2

$Q_{vv}$	tiempo		$X_{prf}$		$t_s$		$E_{esp}$	
$(m^3/m^3\ s)$	cálculo		(dec. b.s.)		(h)		(MJ/ kg agua evaporada)	
	(s)							
	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest
0,01	156	456	0,1596	0,1608	989,27	1033	0,474	0,510
0,02	169	404	0,1612	0,1627	562,69	565,55	1,402	1,465
0,03	191	403	0,1622	0,1636	405,06	405,55	2,757	2,864

(c) Caso 3

$Q_{vv}$	tiempo		$X_{prf}$		$t_s$		$E_{esp}$	
$(m^3/m^3\ s)$	cálculo		(dec. b.s.)		(h)		(MJ/ kg agua evaporada)	
	(s)							
	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest
0,01	75	506	0,1515	0,1529	497,56	524,72	0,199	0,216
0,02	80	451	0,1551	0,1561	262,49	266,30	0,565	0,598
0,03	81	451	0,1573	0,1579	180,59	183,12	1,087	1,117

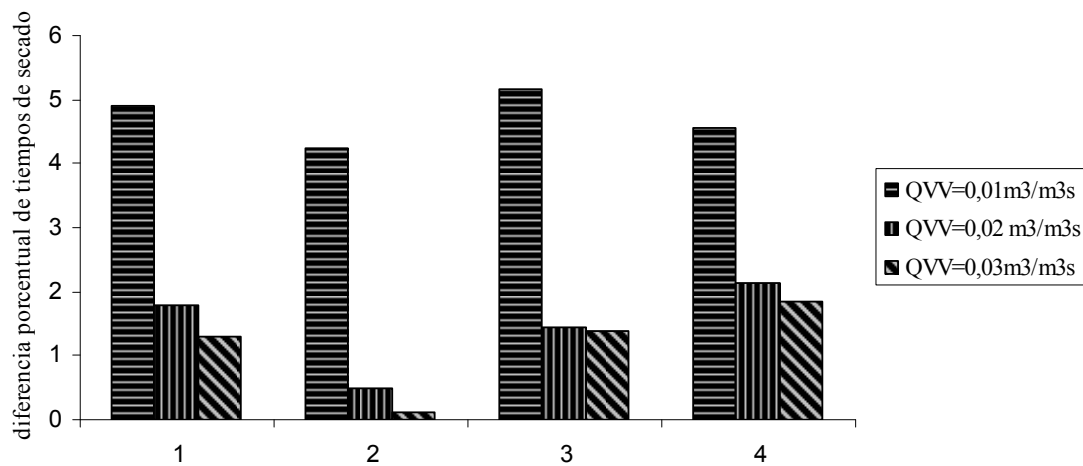
(d) Caso 4

$Q_{vv}$	tiempo		$X_{prf}$		$t_s$		$E_{esp}$	
$(m^3/m^3\ s)$	cálculo		(dec. b.s.)		(h)		(MJ/ kg agua evaporada)	
	(s)							
	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest
0,01	62	502	0,1441	0,1436	396,13	415,09	0,141	0,1425
0,02	66	502	0,1487	0,1499	200,09	204,48	0,377	0,395
0,03	80	396	0,1514	0,1534	134,28	136,76	0,7112	0,7554

Se observa que en todas las condiciones analizadas el tiempo de cálculo es mayor para el modelo NEst: de 3 a 8 veces mayor que el del modelo PsEst.

Por otra parte es necesario analizar las diferencias en los resultados predichos a efectos de determinar la aptitud del modelo simplificado PsEst para representar el secado natural de maíz. Con este propósito se calculan las diferencias porcentuales de tiempo de secado predicho, según la Ec. 20. Estos valores, calculados para todos los casos considerados, se muestran en la Fig. 1.

$$\Delta t_s = \frac{t_{s \text{ NEst}} - t_{s \text{ PsEst}}}{t_{s \text{ NEst}}} \times 100 \quad (20)$$



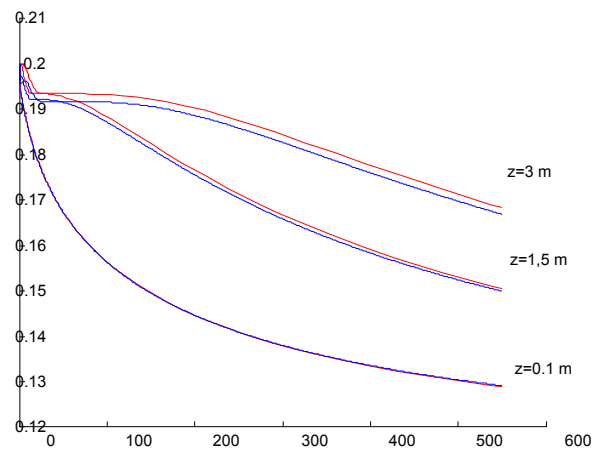
**Fig. 1.** Diferencia porcentual en tiempos de secado predichos por los dos modelos.

1.  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$  2.  $T_a=10^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,60$  3.  $T_a=10^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,40$  4.  $T_a=20^\circ\text{C}$ ,  $h_{ra}=0,40$

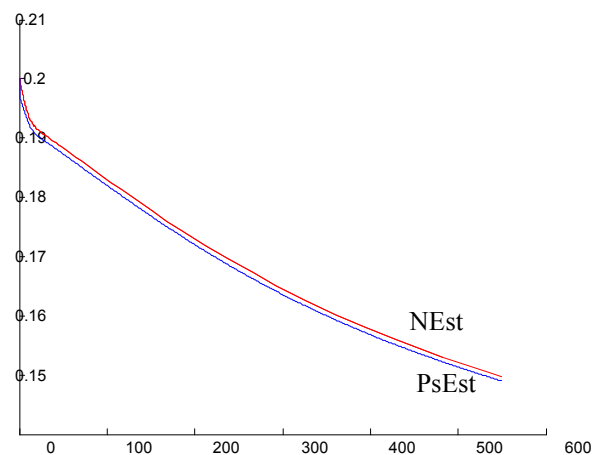
Se observa que la diferencia relativa entre los tiempos de secado es, en todos los casos, inferior al 5,5%. Para todas las combinaciones  $h_{ra}$  y  $T_a$ , la diferencia entre tiempos de secado aumenta al disminuir el  $Q_{VV}$ . Este valor de  $Q_{VV}$  está relacionado directamente con la velocidad del aire en el lecho: a mayor velocidad menor resistencia a la transferencia de masa y energía, y por lo tanto menores los términos de acumulación que es la diferencia principal entre los dos modelos, además de la existencia o no de equilibrio térmico.

La influencia de  $h_{ra}$  y  $T_a$  es bastante menor, con excepción de la condición de 10-0,60; en la cual las diferencias son bastante más bajas, especialmente a caudales de 0,02 y 0,03  $m^3/m^3$  s.

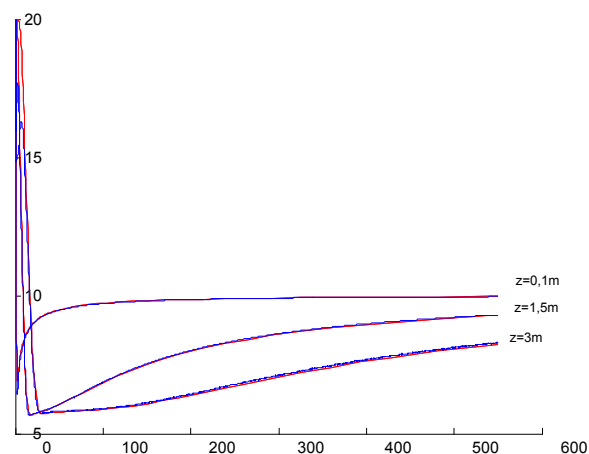
Para visualizar otros aspectos relativos a la comparación de los dos modelos para condiciones del aire constantes se analizaron los perfiles de humedad y temperatura a distintas alturas del lecho y la humedad promedio de los granos, en función del tiempo y para los dos modelos, para condiciones del aire del caso 3 y  $Q_{vv}=0,01$   $m^3/m^3$  s que es la situación que presenta mayor diferencia en tiempo de secado predichos entre los modelos (Fig. 2).



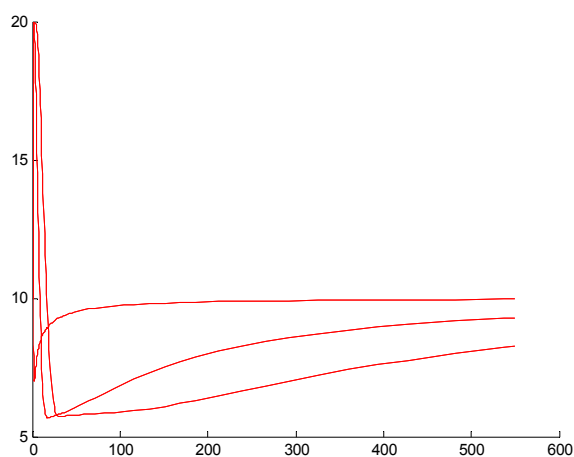
(a) humedad del sólido en función del tiempo para tres posiciones en el lecho



b) humedad promedio en el lecho en función del tiempo



(c) temperatura del solido en función del tiempo para tres posiciones en el lecho



(d) temperatura del aire en función del tiempo para tres posiciones en el lecho

**Fig. 2.** Perfiles de humedad (a, b) y temperatura (c, d). Condiciones del aire constantes. Caso 3.  $Q_{vv}=0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ s}$ . --- NEst --- PsEst

Se aprecia que no hay prácticamente diferencia entre los perfiles predichos por los modelos. También se observa que los perfiles de temperatura del aire y del sólido son idénticos, para el modelo NEst en el que se consideró no equilibrio térmico. Esto avala la suposición de equilibrio térmico que se hace en el modelo PsEst.

### 3.1. Comparación de Modelos PsEst-NEQ y NEst-NEQ. Condiciones del Aire Variables.

Se estudió el secado en condiciones meteorológicas para los meses de febrero a junio, tanto en Junín como en Río Cuarto (Tabla 2).

**Tabla 2.** Comparación de modelos PsEst y NEst. Condiciones del aire variables: meses febrero a junio. (a) Junín y (b) Río Cuarto. Caso base y  $Q_{vv}=0,03$ .  $\Delta z=0,03$  m. PsEst: ode 113 y NEst: ode23tb.

a) Junin

Mes	tiempo cálculo		$X_{prf}$		$E_{esp}$		$X_f$	
	(s)		(dec.,b.s.)		(MJ/ kg agua evaporada)		última capa (dec.,b.s.)	
	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest
Febrero	241	105	0,167	0,171	4,58	4,53	0,173	0,173
(t <sub>s</sub> =670 h)								
Marzo	185	106	0,176	0,175	7,83	7,60	0,178	0,180
(t <sub>s</sub> =730h)								
Abril	179	118	0,179	0,179	8,73	8,43	0,181	0,181
(t <sub>s</sub> =700h)								
Mayo	180	201	0,191	0,190	20,48	18,70	0,191	0,193
(t <sub>s</sub> =730h)								
Junio	187	191	0,193	0,192	24,35	22,93	0,193	0,193
(t <sub>s</sub> =700h)								

b) Río Cuarto

Mes	tiempo cálculo		$X_{prf}$		$E_{esp}$		$X_f$	
	(s)		(dec. b.s.)		(MJ/ kg agua evaporada)		ultima capa (dec. b.s.)	
	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest	PsEst	Nest
Febrero	178	50	0,173	0,172	6,39	6,19	0,173	0,174

(t <sub>s</sub> =670 h)								
Marzo	189	62	0,169	0,168	5,98	5,87	0,171	0,171
(t <sub>s</sub> =730h)								
Abril	178	90	0,175	0,174	7,20	7,03	0,178	0,177
(t <sub>s</sub> =700h)								
Mayo	190	90	0,179	0,178	9,12	8,85	0,182	0,184
(t <sub>s</sub> =730h)								
Junio	183	84	0,179	0,178	8,40	8,19	0,182	0,185
(t <sub>s</sub> =700h)								

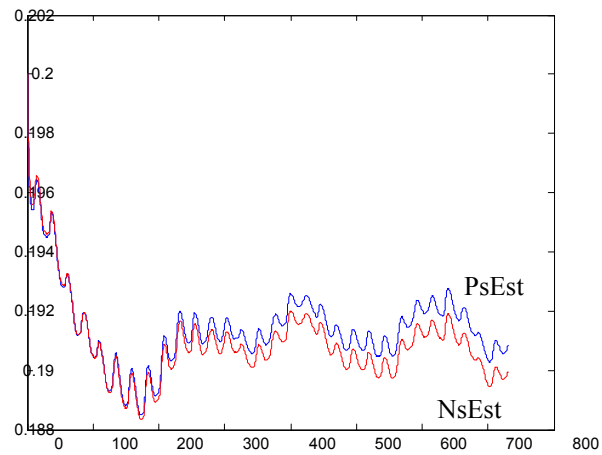
El tamaño de paso de tiempo promedio (determinado como parte del método propio de las odes aplicadas) fue de aprox. 0,07 h para el PsEst y 0.5 h para el NEst.

Se observa que los valores de humedad de última capa y humedad promedio del lecho al finalizar el secado (en estos casos al finalizar el mes) predichos por los dos modelos son prácticamente idénticos.

En cuanto al tiempo de calculo, habiendo encontrado el algoritmo apropiado para el modelo NEst que es el que presentó mayores complicaciones en este aspecto, resultó adecuado y del mismo orden para los dos casos, incluso menores en general para el NEst. Lo que sí se presenta como desventaja para el NEst es su mayor error de truncacion, por el metodo aplicado y por el mayor tamaño de paso de tiempo.

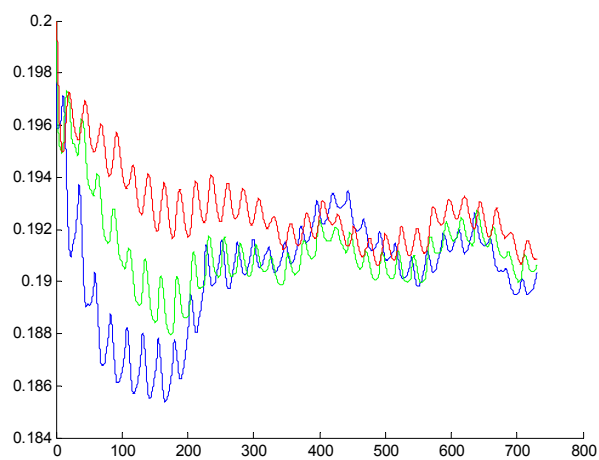
En las Fig. 3, 4 y 5 se muestran los perfiles de humedad y temperatura del solido para uno de los casos mostrados en la Tabla 2, correspondiente al mes de mayo en Junin. En la Fig. 3, se muestra la humedad promedio del lecho en funcion del tiempo predichas por los dos modelos, en las Fig. 4 y Fig. 5 se observan los perfiles de humedad y

temperatura del sólido, respectivamente para tres posiciones del lecho, para los modelos PsEst (a) y NEst (b).



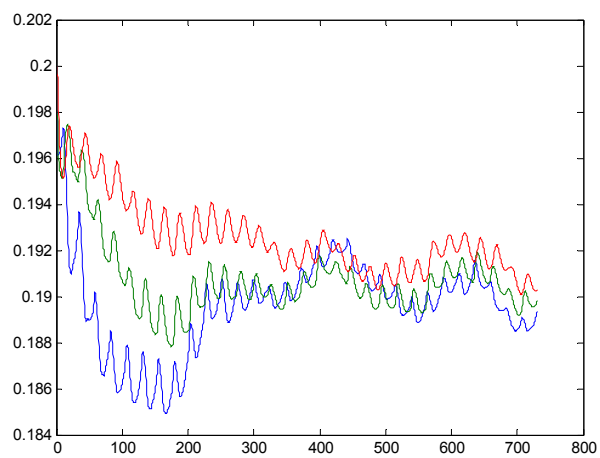
**Fig. 3.** Humedad promedio en el lecho en función del tiempo. Condiciones del aire variables. Mayo-Junín.

(a)



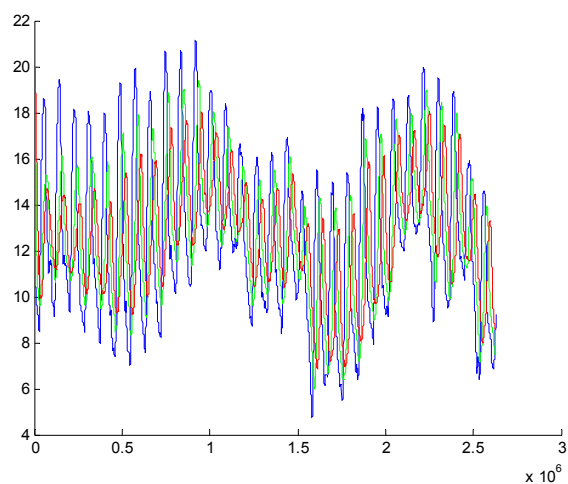


(b)

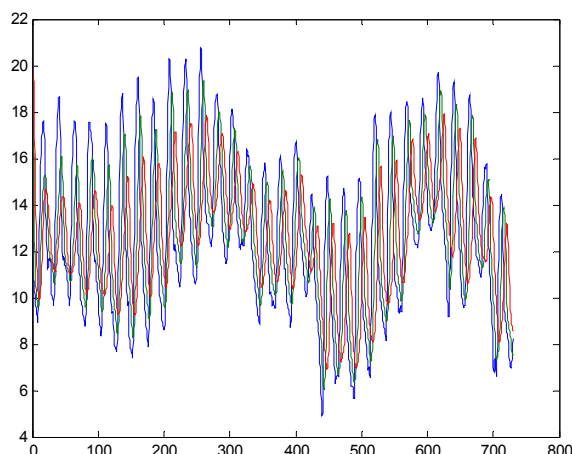


**Fig. 4.** Humedad del sólido en tres posiciones del lecho en función del tiempo. Condiciones del aire variables. Mayo Junin. ---  $z=3\text{m}$  ---  $z=1,5\text{ m}$  ---  $z=0,1\text{m}$   
(a)PsEst (b) NEst

(a)



(b)



**Fig. 5.** Temperatura del sólido en tres posiciones del lecho en función del tiempo. Condiciones del aire variables. Mayo Junin. ---  $z=3\text{m}$  ---  $z=1,5\text{ m}$  ---  $z=0,1\text{m}$   
(a)PsEst (b) NEst

Se aprecia la prácticamente total coincidencia de los perfiles de humedad y temperatura y la escasa diferencia en la humedad promedio.

#### 4. Conclusiones

Considerando los resultados predichos, cualquiera de los dos modelos propuestos puede usarse para predecir el comportamiento del secadero de maíz de lecho fijo a baja temperatura, tanto en condiciones del aire constantes como variables Usando el algoritmo apropiado el tiempo de cálculo del modelo más complejo Nest resulta adecuado. La exactitud de los resultados desde el punto de vista computacional es mayor para el PsEst (por el algoritmo y menor  $\Delta t$ ), aunque en este modelo se han introducido simplificaciones que no han mostrado afectar a los resultados. De lo cual se concluye que el modelo PsEst-NEQ es adecuado.

#### Referencias

- Aregba, A.W.; Nadeau, J. P. (2007). Comparison of two non-equilibrium models for static grain deep-bed drying by numerical simulations. *Journal of Food Engineering* , 78, 1174.
- Bowden, P. J., Lamond, W. J., Smith, E.A. (1983) Simulation of near ambient grain drying I. Comparison of simulations with experimental results. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 28, 279.
- Brooker, D. B., Bakker- Arkema, F.W. , Hall, C.W. (1992).The drying and storage of grains and oilseeds. *Van Nostrand Reinhold, Avi Book*, New York, USA.

- Hossain, M. A.; Bala, B.K. ; Setter, M. A. (2003). Simulation of natural air drying of maize cribs. *Simulation. Modelling Practice and Theory*, 11, 571.
- Jayas, D. S. , White, N. D. G. (2003). Storage and drying in Canada: low cost approaches. *Food Control*, 14, 255.
- Lee, H.S., Matthews, C. J., Braddock, R.D., Sander, G.C., Gandola, F. A. (2004). Matlab method of lines template for transport equations. *Environmental modeling &Software*, 19, 603.
- Lutfy, O. F. S. B. Mohd Noor, K. A. Abbas, M. H. (2008).Marhaban. Some control strategies in agricultural grain driers: A review. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 6 (2), 74.
- Misra M.K, D.B. Brooker. (1980). Thin layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. *Transactions of the ASAE*, 23, 1254.
- Sauer, D. (1992). Storage of Cereal Grains and their Products, 4<sup>th</sup> Ed. American Association of Cereal Chemists, USA.
- Sharp, J.R. (1982). A review of low temperature drying simulation models. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 27, 169.
- Wang, J. J. (1993). Mathematical modelling of the drying process in fixed bed drying. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 24, 229.